

論文の内容の要旨

論文題目	Advanced Digital Signal Processing Technology for Nonlinear Compensation in Wireless Communication Systems (和訳 ワイヤレス通信のための先進的な信号処理技術を用いた非線形補償法の研究)
学位 申請者	Yuelin Ma

一般に電子デバイスを用いた無線回路は非線形特性を有するため、信号にひずみが生じる。特に送信機および受信機のフロントエンドの非線形はシステムの性能に大きな影響を与えるため、非線形補償技術が極めて重要である。本研究は、高度なデジタル信号処理を含む非線形補償のための適応信号処理技術の理論的検討とその実現に関する研究である。理論解析および汎用測定器による実験に加えて、高速DA/AD変換器も含めた実際の回路(FPGA, DSPなど)での広帯域信号処理実装を研究対象に含む。

第1章では無線通信システムにおけるブロードバンド化と大容量化の進展と其中で用いられる無線送受信機の非線形性の問題が指摘される。これに対して非線形補償技術が有効と考えられ、詳細な検討を行うための本論文の章構成が示される。

第2章では非線形補償の対象であるデジタル変調信号の性質と非線形電力増幅器の基礎が与えられる。

第3章では非線形補償の基礎となる数学モデルでの表現法を紹介すると共に、非線形モデルの逆関数を与えられた次数の範囲で高精度に求める方法を提案し、その効果を確認している。

第4章では実験と実際の回路実装時に考慮すべき問題に着目し、これらの問題を解決するための信号処理技術について述べ、併せて本論文で使われる実験用プラットフォームを紹介する。

第5章ではマルチキャリア信号の増幅に着目し、そこでの非線形を有効に補償する技術を提案した。ドハティ増幅器はマルチキャリア信号の高効率な増幅に適するが、複雑な非線形特性を有するため、安定かつ高精度な非線形補償を可能とすることが困難であり、特に隣接チャネル漏洩電力規格の厳しいGSMシステム送信機用へのドハティ増幅器用デジタルプリディストーション(Digital Predistortion; DPD)方式の適用はこれまで報告されていない。本章ではこの非線形補償を実現するため、新しいDPDのアルゴリズムを考案し、0.2ms以下の収束速度を実現した。またメモリ効果を有する複雑な非線形を補償するために複数の

非線形補償テーブルを用いつつ、アルゴリズムの最適化によって回路規模を抑え、FPGAへの簡易な実装を可能とし、十分な補償性能を得られることを実証した。

第6章では低速度のAD変換器を用いる広帯域DPDを実現するための方法を提案している。一般にDPDの安定化・高精度化のためのフィードバック回路は、非線形によって帯域幅の広がった信号を受信するため、帯域幅が十分大きい必要がある。そのため、高速AD変換器と高速信号処理が必要になり、コストが高くなるという問題があった。そこで非線形信号の帯域幅に比べて狭帯域のAD変換器を用いて信号を処理する技術を提案した。この手法により、標本化周波数が200 MHzのAD変換器を用いながら、800MHz以上の非線形信号帯域幅を有する信号の非線形補償を実現した。

第7章では受信機の非線形問題を考察し、リアルタイムのブラインド非線形補償法を提案する。希望信号に隣接する帯域に強い妨害波がある場合、受信信号は受信フロントエンドの非線形による相互変調ひずみの影響を受け、受信特性が大きく劣化する。妨害波は多くの場合に未知の信号なので、入力信号が不定のままでもこれによるひずみを補償できるブラインド非線形補償技術が必要である。本章で提案するブラインド補償法は、妨害波の帯域外の相互変調ひずみ電力を測定し、これを最小化することを目標として非線形補償器の係数を求める。提案法をFPGAに実装した実験によってブラインド補償が可能であることを示した。

第8章では前章の方法を拡張し、二つの帯域を同時に受信するConcurrent Dual-Band受信機の非線形補償技術を提案した。無線通信のトラフィックの増加は著しく、第4世代の移動通信システムLTE-Advancedでは複数の帯域を同時に使用するCarrier Aggregationの導入が決定されている。この場合、送信機と受信機は異なる帯域に渡る複数キャリアを同時に送信・受信することになる。

Concurrent Dual-Band受信機ではフロントエンドが複数帯域で共有されるので、小型化と省電力化に有利である。しかし回路の非線形性は周波数帯域によって異なり、電波伝搬特性も異なるため、相互変調ひずみの影響が複雑かつ顕著となる。そこでフロントエンドの非線形を帯域毎の多項式モデルとして扱い、その係数を求めるブラインド非線形補償法を提案し、その効果を実験で実証した。

第9章ではConcurrent Dual-Band送信機の非線形を補償する技術に着目し、従来法より複雑度が大幅に低減されるSpectra Folding Feedback Architecture によるDPD技術を提案した。この手法では、複数帯域を帯域毎に分離してフィードバックしそれぞれAD変換していた従来の方法に比べて、複数帯域を一括してフィードバックしAD変換できるため、DPDのフィードバック回路のコストを削減することができる。提案法の非線形補償効果が従来法と同じ性能を有することを実験で示し、提案法の有効性を実証した。

第10章は以上の得られた結果をまとめ今後の課題を示している。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 馬 岳林

審査委員主査 山尾 泰

委員 唐沢 好男

委員 本城 和彦

委員 小島 年春

委員 藤井 威生

一般に電子デバイスを用いた無線回路は非線形特性を有するため、信号にひずみが生じる。特に送信機および受信機のフロントエンドの非線形はシステムの性能に大きな影響を与えるため、非線形補償技術が極めて重要である。本研究は、高度なデジタル信号処理を含む非線形補償のための適応信号処理技術の理論的検討とその実現に関する研究である。理論解析および汎用測定器による実験に加えて、高速DA/AD変換器も含めた実際の回路(FPGA, DSPなど)での広帯域信号処理実装を研究対象に含む。

第1章では無線通信システムにおけるブロードバンド化と大容量化の進展とその中で用いられる無線送受信機の非線形性の問題が指摘される。これに対して非線形補償技術が有効と考えられ、詳細な検討を行うための本論文の章構成が示されている。

第2章では非線形補償の対象であるデジタル変調信号の性質と非線形電力増幅器の基礎が与えられている。

第3章では非線形補償の基礎となる数学モデルでの表現法を紹介すると共に、非線形モデルの逆関数を与えられた次数の範囲で高精度に求める方法を提案し、その効果を確認している。

第4章では実験と実際の回路実装時に考慮すべき問題に着目し、これらの問題を解決するための信号処理技術について述べ、併せて本論文で使われる実験用プラットフォームを紹介している。

第5章ではマルチキャリア信号の増幅に着目し、そこでの非線形を有効に補償する技術を提案した。ドハティ増幅器はマルチキャリア信号の高効率な増幅に適するが、複雑な非線形特性を有するため、安定かつ高精度な非線形補償を可能とすることが困難であり、特に隣接チャネル漏洩電力規格の厳しいGSMシステム送信機用へのドハティ増幅器用デジタルプリディストーション(Digital Predistortion: DPD)方式の適用はこれまで報告されていない。本章ではこの非線形補償を実現するため、新しいDPDのアルゴリズムを考案し、0.2ms以下の収束速度を実現した。またメモリ効果を有する複雑な非線形を補償するために複数の

非線形補償テーブルを用いつつ、アルゴリズムの最適化によって回路規模を抑え、FPGAへの簡易な実装を可能とし、十分な補償性能を得られることを実証した。

第6章では低速度のAD変換器を用いる広帯域DPDを実現するための方法を提案している。一般にDPDの安定化・高精度化のためのフィードバック回路は、非線形によって帯域幅の広がった信号を受信するため、帯域幅が十分大きい必要がある。そのため、高速AD変換器と高速信号処理が必要になり、コストが高くなるという問題があった。そこで非線形信号の帯域幅に比べて狭帯域のAD変換器を用いて信号を処理する技術を提案した。この手法により、標本化周波数が200 MHzのAD変換器を用いながら、800MHz以上の非線形信号帯域幅を有する信号の非線形補償を実現した。

第7章では受信機の非線形問題を考察し、リアルタイムのブラインド非線形補償法を提案する。希望信号に隣接する帯域に強い妨害波がある場合、受信信号は受信フロントエンドの非線形による相互変調ひずみの影響を受け、受信特性が大きく劣化する。妨害波は多くの場合に未知の信号なので、入力信号が不定のままでもこれによるひずみを補償できるブラインド非線形補償技術が必要である。本章で提案するブラインド補償法は、妨害波の帯域外の相互変調ひずみ電力を測定し、これを最小化することを目標として非線形補償器の係数を求める。提案法をFPGAに実装した実験によってブラインド補償が可能であることを示している。

第8章では前章の方法を拡張し、二つの帯域を同時に受信するConcurrent Dual-Band受信機の非線形補償技術を提案した。無線通信のトラフィックの増加は著しく、第4世代の移動通信システムLTE-Advancedでは複数の帯域を同時に使用するCarrier Aggregationの導入が決定されている。この場合、送信機と受信機は異なる帯域に渡る複数キャリアを同時に送信・受信することになる。Concurrent Dual-Band受信機ではフロントエンドが複数帯域で共有されるので、小型化と省電力化に有利である。しかし回路の非線形性は周波数帯域によって異なり、電波伝搬特性も異なるため、相互変調ひずみの影響が複雑かつ顕著となる。そこでフロントエンドの非線形を帯域毎の多項式モデルとして扱い、その係数を求めるブラインド非線形補償法を提案し、その効果を実験で実証している。

第9章ではConcurrent Dual-Band送信機の非線形を補償する技術に着目し、従来法より複雑度が大幅に低減されるSpectra Folding Feedback Architecture によるDPD技術を提案した。この手法では、複数帯域を帯域毎に分離してフィードバックしそれぞれAD変換していた従来の方法に比べて、複数帯域を一括してフィードバックしAD変換できるため、DPDのフィードバック回路のコストを削減することができる。提案法の非線形補償効果が従来法と同じ性能を有することを実験で示し、提案法の有効性を実証している。

第10章は以上の得られた結果をまとめ今後の課題を示している。

以上の論文を総括すると、本研究では高度なデジタル信号処理を含む非線形補償のための適応信号処理技術の理論的検討といくつかの有用な提案がなされると共に、その実現に関する詳細な研究がなされており、学術的価値が高く、かつ論文の構成も適切で明瞭である。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。